

УДК 621.793

<sup>1</sup>М. А. Белоцерковский, д-р техн. наук, проф., <sup>1</sup>А. А. Курилёнок, канд. техн. наук,

<sup>2</sup>К. Е. Белявин, д-р техн. наук, проф., <sup>1</sup>И. А. Сосновский,

<sup>1</sup>А. И. Комаров, канд. техн. наук, <sup>1</sup>Д. В. Орда

<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, РБ,

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, РБ.

тел.: 250-15-42; E-mail: akto13@mail.ru

## К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА МНОГОСЛОЙНОЙ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ НАПЛАВКИ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

*В работе представлена оптимизация процесса многослойной центробежной индукционной наплавки антифрикционных покрытий из алюминиевых сплавов с использованием методов математического планирования эксперимента. Это позволило разработать математическую модель процесса и определить оптимальную область значений технологических режимов, также были установлены зависимости минимальной интенсивности изнашивания материала покрытия от параметров многослойной центробежной наплавки покрытий. Так в качестве основных факторов, влияющих на величину интенсивности изнашивания покрытия были определены следующие – температура нагрева детали, время изотермической выдержки, частота вращения детали. На основании результатов расчетно-экспериментального моделирования, были определены диапазоны значений параметров процесса многослойной центробежной наплавки, для получения оптимальной интенсивности изнашивания материала покрытия на основе алюминиевого сплава.*

**Ключевые слова:** оптимизация, методы математического планирования, математическая модель, антифрикционные покрытия, сплавы на основе алюминия, свинцовый порошковый подслои, многослойная центробежная индукционная наплавка.

M. A. Belotserkovsky, A. A. Kurilyonok, K. E. Belyavin, I. A. Sosnovsky, A. I. Komarov, D. V. Orda

## ON THE QUESTION OF OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF MULTILAYER CENTRIFUGAL PROCESSING OF ANTI-FRICTION COATINGS

*The paper presents the optimization of the process of multilayer centrifugal induction surfacing of anti-friction coatings from aluminum alloys using the methods of mathematical planning of the experiment. This made it possible to develop a mathematical model of the process and to determine the optimal range of values of technological modes, the dependences of the minimum intensity of wear of the coating material on the parameters of multilayer centrifugal surfacing of coatings were also established. So as the main factors influencing the value of the intensity of wear of the coating, the following were determined - the heating temperature of the part, the time of iso-thermal exposure, the rotation frequency of the part. Based on the results of computational and experimental modeling, the ranges of values of the parameters of the process of multilayer centrifugal surfacing were determined to obtain the optimal wear rate of the coating material based on the aluminum alloy.*

**Keywords:** optimization, mathematical planning methods, mathematical model, anti-friction coatings, aluminum-based alloys, lead powder sublayer, multilayer centrifugal induction surfacing

### 1. Введение

Процессы нанесения покрытий с применением электрофизического нагрева широко используются в технике для восстановления, упрочнения и изготовления деталей различного назначения. Индукционный нагрев является одним из видов электротермического нагрева, который сочетает в себе такие достоинства, как бесконтактная передача энергии от индуктора к детали, высокий КПД использования электроэнергии, возможность поверхностного и локального нагревания [1–2].

Центробежный метод нанесения покрытий предусматривает обязательное вращение детали (стальной заготовки) для обеспечения формования наносимого материала. Покрытия могут быть образованы на внутренних, наружных, торцевых поверхностях цилиндрических и плоских деталей методами одиночной или групповой обработ-

ки. Технология позволяет наносить покрытия в режимах припекания и наплавки, сочетать одновременно процессы сварки и наплавки [3–5]. Кроме того, согласно [3, 6–7], использование данной технологии позволяет получать изделия с антифрикционными покрытиями типа стальная втулка с антифрикционными и износостойкими покрытиями на основе никелевых, железных и медных сплавов.

В качестве альтернативы технологиям нанесения покрытий из сплавов на медной основе в узлах триботехнического назначения, работающих при давлениях до 30 МПа, в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси разрабатывается технология нанесения композиций на основе алюминиевых сплавов на стальные изделия методом многослойной индукционной наплавки в поле центробежных сил [8–9], которая должна обеспечивать повышение структурных и физико-механических свойств наносимых покрытий из алюминиевых сплавов на рабочие поверхности деталей узлов трения различных машин и механизмов, а также повышение конструкционной прочности, надежности, долговечности и ресурса работы биметаллических деталей.

Для обоснованного выбора технологических режимов многослойной центробежной индукционной наплавки на основе алюминиевых сплавов, обеспечивающих минимальную величину интенсивности изнашивания рабочих поверхностей наплавленного покрытия, а также сокращения продолжительности и объема испытаний были использованы методы математического планирования эксперимента [10]. Это позволит обеспечить заданные характеристики и качества деталей наиболее производительным путем при минимальных затратах.

Целью настоящей работы является установление зависимости минимальной интенсивности изнашивания материала покрытия  $I_q$  (мг/м) от параметров многослойной индукционной центробежной наплавки покрытий из алюминиевых сплавов. В качестве основных факторов, влияющих на величину интенсивности изнашивания покрытия, рассматривались температура нагрева детали  $T$  (°C), время изотермической выдержки  $t$  (мин), частота вращения детали  $n$  (об/мин).

## 2. Материалы, оборудование, методика и объект исследования

В качестве материала для нанесения покрытия использовали алюминиево-кремниевый сплав АК12 (ГОСТ 1583-93). Этот сплав имеет повышенный уровень литейных и механических свойств, а также обладает удовлетворительной коррозионной стойкостью при температурах до 200 °C. Данный сплав был представлен кусками проволоки диаметром 1,75–2,0 мм и длиной 10–15 мм, масса которых обеспечивала получение покрытия толщиной 4–5 мм на сторону. Состав сплава АК12 приведен в таблице 1.

Таблица 1. - Состав сплава АК12 (в мас.%)

Si	Fe	Cu	Mn	Ti	Mg	Zn	Al
10-13	до 1,5	до 0,6	до 0,5	до 0,01	до 0,1	до 0,3	ост.

Высокий процент кремния (10–13 мас.%) в сплаве обеспечивает хорошую жидкотекучесть и литейные свойства (дает малую усадку и практически не образует трещин), позволяя понижать температуру литья, а также делает сплав АК12 более теплоустойчивым и износостойким, по сравнению с бронзой. В качестве материала подслоя использовали порошок свинца марки ПС-1. При этом размер порошковых частиц свинца составлял 0,5–0,63 мм, а толщина подслоя – 1,0–1,5 мм на сторону. Для раскисления загружаемой во внутреннюю полость наносимой шихты использовали покровно-

модифицирующий флюс в количестве 5 % от массы металлической составляющей шихты.

Многослойная индукционная центробежная наплавка осуществлялась на оборудовании, включающем генератор токов высокой частоты (ТВЧ) типа ЛПЗ-2-67М, мощностью 60 кВт, частотой 66 кГц, рамочный индуктор, программный регулятор ТРМ 151 (ООО «Овен»), инфракрасный пирометр TemPro-2200 и установку центробежной индукционной наплавки (конструкции Объединенного института машиностроения НАН Беларуси) с регулируемой частотой вращения до 3000 об/мин. Температура нагрева контролировалась пирометром TemPro-2200, время нагрева контролировалось электронным секундомером ИВПР-203М ТУ 4282-001-33865949-2009. При наплавке шихта размещалась в полости стальной втулки, изготовленной из стали 20 (ГОСТ 1050). Для последующих исследований полученные образцы подвергались токарной и дробеструйной обработке.

Триботехнические испытания образцов проводились на многофункциональном трибометре MFT-5000 (Rtec Instruments, США) по схеме возвратно-поступательного перемещения образца относительно неподвижного стального контртела, в качестве которого использовался торец стального ролика из сплава ШХ15 (твердость 60–62 HRC) диаметром 3 мм. Испытание проводилось при давлениях  $p$ , равных 10, 20 и 30 МПа. Амплитуда перемещения составляла 5 мм с частотой 10 Гц. Длительность испытания в нагруженном состоянии составляла 2 ч. По результатам испытаний определялся коэффициент трения  $f$ , массовый износ  $\Delta m$ , интенсивность изнашивания  $Iq$  ( $Iq = \Delta m/L$ , где  $L$  – суммарный путь трения), а также суммарный линейный износ пары трения. Потеря массы  $\Delta m$  образцов определялась путем взвешивания на аналитических весах ВЛР-200.

### 3. Полученные результаты и их обсуждение

Математическая модель уравнения отклика от независимых переменных с учетом эффектов их взаимодействий и ошибки эксперимента была представлена в виде полинома второй степени:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < l \leq k} b_{il} x_i x_l + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2,$$

где  $y$  – параметр оптимизации;

$k$  – число факторов;

$i, l$  – номера факторов,  $i \neq l$ ;

$x_i, x_l$  – варьируемые факторы;

$b_0, b_i, b_{il}, b_{ii}$  – коэффициенты регрессии, описывающие направление и степень влияния каждого из факторов на параметр оптимизации.

Для получения модели процесса в виде полинома второй степени реализован некомпозиционный план второго порядка. Использование некомпозиционных планов, предусматривающих всего три уровня варьирования факторов (+1, 0, -1), упрощает и удешевляет проведение эксперимента. Некомпозиционные планы характеризуются наличием в строках матрицы планирования большого числа нулей, в результате чего существенно упрощается вычисление коэффициентов модели.

Основное влияние на интенсивность изнашивания наплавленного покрытия оказывают температура при изотермической выдержке, время изотермической выдержки и частота вращения детали. Поэтому для исследования в качестве варьируемых факторов были взяты:  $n$  – частота вращения детали, об/мин,  $T$  – температура нагрева детали °С;  $t$

– время изотермической выдержки, мин. В качестве параметра оптимизации приняли величину интенсивности изнашивания детали  $I_q$ , мг/м. На основе априорной информации были выбраны уровни и интервалы варьирования факторов (табл. 2).

Таблица 2. - Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы (параметры)	Кодовое обозначение	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
			основ-ной 0	верх-ний +1	ниж-ний -1
Частота вращения детали $n$ , об/мин	$x_1$	250	1750	2000	1500
Температура нагрева детали $T$ , °C	$x_2$	50	800	850	750
Время изотермической выдержки $t$ , с	$x_3$	2	8	10	6

Матрица некомпозиционного плана второго порядка для трех факторов представлена в таблице 3.

Таблица 3. - Матрица планирования и результаты опытов

Номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_3^2$	$I_q$ , мг/м
1	+	+	+	0	+	0	0	+	+	0	0,0003140
2	+	+	-	0	-	0	0	+	+	0	0,0002040
3	+	-	+	0	-	0	0	+	+	0	0,0005800
4	+	-	-	0	+	0	0	+	+	0	0,0006350
5	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0000090
6	+	+	0	+	0	+	0	+	0	+	0,0003100
7	+	+	0	-	0	-	0	+	0	+	0,0001920
8	+	-	0	+	0	-	0	+	0	+	0,0006200
9	+	-	0	-	0	+	0	+	0	+	0,0005930
10	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0000190
11	+	0	+	+	0	0	+	0	+	+	0,0002100
12	+	0	+	-	0	0	-	0	+	+	0,0000890
13	+	0	-	+	0	0	-	0	+	+	0,0000690
14	+	0	-	-	0	0	+	0	+	+	0,0000800
15	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0000170

В соответствии с условиями опытов наплавливали покрытие и замеряли величину интенсивности изнашивания. Значения  $I_q$ , указанные в таблице 3, получены как средние из трех измерений.

По данным опытов, проведенных согласно матрице планирования, получена модель, характеризующая зависимость  $I_q$  от исследуемых факторов процесса и представляет собой полином второй степени:

$$I_q = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2. \quad (1)$$

Коэффициенты модели вычисляли по приведенным формулам.

$$b_0 = \frac{1}{3} \sum_{u=1}^3 y_{0u};$$

$$b_i = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^{15} x_{ij} y_j;$$

$$b_{il} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{15} x_{ij} x_{lj} y_j;$$

$$b_{ii} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{15} x_{ij}^2 y_j - \frac{1}{16} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{15} x_{ij}^2 y_j - \frac{1}{6} \sum_{u=1}^3 y_{0u}.$$

После вычислений получены следующие значения коэффициентов уравнения регрессии (с округлением до 3-х знаков после запятой):

$$b_0 = 0,15 \cdot 10^{-4}; \quad b_1 = -1,76 \cdot 10^{-4}; \quad b_2 = 0,256 \cdot 10^{-4}; \quad b_3 = 0,319 \cdot 10^{-4};$$

$$b_{12} = 0,413 \cdot 10^{-4}; \quad b_{13} = 0,228 \cdot 10^{-4}; \quad b_{23} = 0,33 \cdot 10^{-4};$$

$$b_{11} = 3,675 \cdot 10^{-4}; \quad b_{22} = 0,5075 \cdot 10^{-4}; \quad b_{33} = 0,4625 \cdot 10^{-4}.$$

Дисперсию  $s^2\{I_q\}$  параметра оптимизации определяли по результатам опытов в центре плана (табл. 3, опыты 5; 10; 15). Для вычисления дисперсии  $s^2\{I_q\}$  составлена вспомогательная таблица (табл. 4).

Таблица 4. - Вспомогательная таблица для расчета  $s^2\{I_q\}$

Номер опыта в центре плана	$I_q$	$\bar{I}_q$	$I_q - \bar{I}_q$	$(I_q - \bar{I}_q)^2$
5	$0,09 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$-0,06 \cdot 10^{-4}$	$0,36 \cdot 10^{-10}$
10	$0,19 \cdot 10^{-4}$		$0,04 \cdot 10^{-4}$	$0,16 \cdot 10^{-10}$
15	$0,17 \cdot 10^{-4}$		$0,02 \cdot 10^{-4}$	$0,04 \cdot 10^{-10}$
$s^2\{I_q\} = \frac{s_E}{n_0 - 1} = \frac{0,56 \cdot 10^{-10}}{3 - 1} = 0,28 \cdot 10^{-10}$				$s_E = \sum (I_q - \bar{I}_q)^2 = 0,56 \cdot 10^{-10}$

Дисперсии, характеризующие ошибки в определении коэффициентов уравнения регрессии, вычисляли по приведенным формулам при числе факторов  $k = 3$ . Получены следующие значения дисперсий:

$$s^2\{b_0\} = \frac{1}{3} s^2\{I_q\} = 0,093 \cdot 10^{-10};$$

$$s^2\{b_i\} = \frac{1}{8} s^2\{I_q\} = 0,035 \cdot 10^{-10};$$

$$s^2\{b_{il}\} = \frac{1}{4} s^2\{I_q\} = 0,07 \cdot 10^{-10};$$

$$s^2\{b_{ii}\} = \frac{13}{48} s^2\{I_q\} = 0,076 \cdot 10^{-10}.$$

Для проверки значимости коэффициентов модели находим их доверительные интервалы. Доверительный интервал  $\Delta b_0$  коэффициента  $b_0$  находим по выражению:

$$\Delta b_0 = \pm t_T s\{b_0\} = \pm 2,04 \cdot 0,031 \cdot 10^{-4} = \pm 0,062 \cdot 10^{-4}, \quad (2)$$

где  $t_T$  – табличное значение критерия Стьюдента; при числе степеней свободы  $f$  равном 30 и 5 %-ном уровне значимости  $t_T = 2,04$ .

$$f = (n-1) \cdot N = (3-1) \cdot 15 = 30,$$

где  $N$  – число опытов в матрице планирования;

$n$  – число параллельных опытов.

Аналогично определяем доверительные интервалы коэффициентов  $b_i, b_{il}, b_{ii}$ :

$$\Delta b_i = \pm t_T s\{b_i\} = \pm 0,038 \cdot 10^{-4};$$

$$\Delta b_{il} = \pm t_T s\{b_{il}\} = \pm 0,054 \cdot 10^{-4};$$

$$\Delta b_{ii} = \pm t_T s\{b_{ii}\} = \pm 0,056 \cdot 10^{-4}.$$

Коэффициент значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала. Коэффициенты  $b_{12}, b_{13}$  и  $b_{23}$  меньше доверительного интервала, поэтому их можно признать статистически незначимыми и исключить из уравнения регрессии. Тогда уравнение регрессии (1) получает вид:

$$I_q = 0,15 \cdot 10^{-4} - 1,76 \cdot 10^{-4} x_1 + 0,256 \cdot 10^{-4} x_2 + 0,319 \cdot 10^{-4} x_3 + 0,413 \cdot 10^{-4} x_1 x_2 + 0,228 \cdot 10^{-4} x_1 x_3 + 0,33 \cdot 10^{-4} x_2 x_3 + 3,675 \cdot 10^{-4} x_1^2 + 0,508 \cdot 10^{-4} x_2^2 + 0,463 \cdot 10^{-4} x_3^2, \quad (3)$$

Таблица 5. – Вспомогательная таблица для вычисления  $s_R$

Номер опыта	$I_q$	$\hat{I}_q$	$I_q - \hat{I}_q$	$(I_q - \hat{I}_q)^2$
1	$3,14 \cdot 10^{-4}$	$3,24 \cdot 10^{-4}$	$-0,10 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{-10}$
2	$2,04 \cdot 10^{-4}$	$1,90 \cdot 10^{-4}$	$0,14 \cdot 10^{-4}$	$1,86 \cdot 10^{-10}$
3	$5,8 \cdot 10^{-4}$	$5,94 \cdot 10^{-4}$	$-0,14 \cdot 10^{-4}$	$1,86 \cdot 10^{-10}$
4	$6,35 \cdot 10^{-4}$	$6,25 \cdot 10^{-4}$	$0,10 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{-10}$
5	$0,09 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$-0,06 \cdot 10^{-4}$	$0,36 \cdot 10^{-10}$
6	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$3,07 \cdot 10^{-4}$	$0,03 \cdot 10^{-4}$	$0,07 \cdot 10^{-10}$
7	$1,92 \cdot 10^{-4}$	$1,98 \cdot 10^{-4}$	$-0,06 \cdot 10^{-4}$	$0,38 \cdot 10^{-10}$
8	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$6,14 \cdot 10^{-4}$	$0,06 \cdot 10^{-4}$	$0,38 \cdot 10^{-10}$
9	$5,93 \cdot 10^{-4}$	$5,96 \cdot 10^{-4}$	$-0,03 \cdot 10^{-4}$	$0,07 \cdot 10^{-10}$
10	$0,19 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,04 \cdot 10^{-4}$	$0,16 \cdot 10^{-10}$
11	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$2,03 \cdot 10^{-4}$	$0,08 \cdot 10^{-4}$	$0,56 \cdot 10^{-10}$
12	$0,89 \cdot 10^{-4}$	$0,73 \cdot 10^{-4}$	$0,16 \cdot 10^{-4}$	$2,64 \cdot 10^{-10}$
13	$0,69 \cdot 10^{-4}$	$0,85 \cdot 10^{-4}$	$-0,16 \cdot 10^{-4}$	$2,64 \cdot 10^{-10}$
14	$0,8 \cdot 10^{-4}$	$0,88 \cdot 10^{-4}$	$-0,08 \cdot 10^{-4}$	$0,56 \cdot 10^{-10}$
15	$0,17 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	$0,02 \cdot 10^{-4}$	$0,04 \cdot 10^{-10}$
$s_R = \sum (I_q - \hat{I}_q)^2 = 13,62 \cdot 10^{-10}$				

Адекватность полученной модели проверяем по F-критерию Фишера. Для вычисления дисперсии  $s_{ад}^2$  адекватности находим сумму  $s_R$  квадратов отклонений рас-

четных значений  $\hat{I}_q$  от экспериментальных  $I_q$  во всех точках плана (табл. 5). Расчетные значения  $\hat{I}_q$  определяем по выражению (3),  $s_E = 0,56 \cdot 10^{-10}$  (см. табл. 4).

Находим дисперсию:

$$s_{ad}^2 = \frac{s_R - s_E}{N - k' - (n_0 - 1)} = \frac{13,62 \cdot 10^{-10} - 0,56 \cdot 10^{-10}}{15 - 10 - (3 - 1)} = 4,35 \cdot 10^{-10},$$

где  $N$  – общее количество опытов;

$k'$  – количество коэффициентов аппроксимирующего полинома (количество значимых факторов);

$n_0$  – количество опытов в центре плана.

Дисперсия  $s^2\{I_q\} = 0,28 \cdot 10^{-10}$  (см. табл. 4), поэтому расчетное значение  $F$ -критерия:

$$F_P = \frac{s_{ad}^2}{s^2\{I_q\}} = \frac{4,35 \cdot 10^{-10}}{0,28 \cdot 10^{-10}} = 15,54.$$

Табличное значение  $F$ -критерия при 5 %-ном уровне значимости и числах степеней свободы для большей дисперсии  $m_1 = N - k' - n_0 + 1 = 3$ , меньшей дисперсии  $m_2 = n_0 - 1 = 2$ ,  $F_T = 19,2$ . Так как  $F_P < F_T$ , полученная модель (3) адекватна при 5 %-ном уровне значимости.

Находим дисперсию:

$$s_{ad}^2 = \frac{s_R - s_E}{N - k' - (n_0 - 1)} = \frac{13,62 \cdot 10^{-10} - 0,56 \cdot 10^{-10}}{15 - 10 - (3 - 1)} = 4,35 \cdot 10^{-10},$$

где  $N$  – общее количество опытов;

$k'$  – количество коэффициентов аппроксимирующего полинома (количество значимых факторов);

$n_0$  – количество опытов в центре плана.

Дисперсия  $s^2\{I_q\} = 0,28 \cdot 10^{-10}$  (см. табл. 4), поэтому расчетное значение  $F$ -критерия:

$$F_P = \frac{s_{ad}^2}{s^2\{I_q\}} = \frac{4,35 \cdot 10^{-10}}{0,28 \cdot 10^{-10}} = 15,54.$$

Табличное значение  $F$ -критерия при 5 %-ном уровне значимости и числах степеней свободы для большей дисперсии  $m_1 = N - k' - n_0 + 1 = 3$ , меньшей дисперсии  $m_2 = n_0 - 1 = 2$ ,  $F_T = 19,2$ . Так как  $F_P < F_T$ , полученная модель (3) адекватна при 5 %-ном уровне значимости.

Анализ уравнения (3) показывает, что в пределах установленных интервалов варьирования факторов увеличение фактора  $x_1$  в большей степени влияет на уменьшение показателя интенсивности изнашивания, чем у факторов  $x_2$  и  $x_3$ , однако в связи с наличием квадратичных членов в уравнении (3) зависимость эта носит нелинейный характер, что наиболее сильно проявляется через фактор  $x_1$ .

Для удобства интерпретации полученных результатов и использования уравнения (3) для практических расчетов необходимо перейти от кодированных значений ( $x_1$ ,

$x_2, x_3$ ) факторов к натуральным значениям ( $n, T, t$ ). Для этого использовали следующие формулы:

$$x_1 = \frac{n - n_0}{\Delta n}; \quad x_2 = \frac{T - T_0}{\Delta T}; \quad x_3 = \frac{t - t_0}{\Delta t},$$

где  $n_0, T_0, t_0$  – натуральные значения факторов на основных уровнях;  $\Delta n, \Delta T, \Delta t$  – значения интервалов варьирования.

Таким образом, в соответствии с таблицей 2,

$$x_1 = \frac{n - 1750}{250}; \quad x_2 = \frac{T - 800}{50}; \quad x_3 = \frac{t - 8}{2}.$$

С учетом перехода к натуральным значениям факторов уравнение регрессии (3) примет вид:

$$I_q \cdot 10^{-4} = 398,39 - 0,243 \cdot n - 0,404 \cdot T - 5,13 \cdot t + 0,000033 \cdot n \cdot T + 0,00046 \cdot n \cdot t + 0,0033 \cdot T \cdot t + 0,000059 \cdot n^2 + 0,0002 \cdot T^2 + 0,116 \cdot t^2. \quad (4)$$

Уравнение регрессии (4) можно использовать для выбора технологических режимов центробежной индукционной наплавки, обеспечивающих минимальную величину интенсивности изнашивания рабочих поверхностей наплавленного покрытия. На рисунках 1–3 представлены полученные с помощью уравнения (4) графические зависимости интенсивности изнашивания от исследуемых факторов. При построении поверхности откликов (программа SigmaPlot 12) варьировались только два фактора.

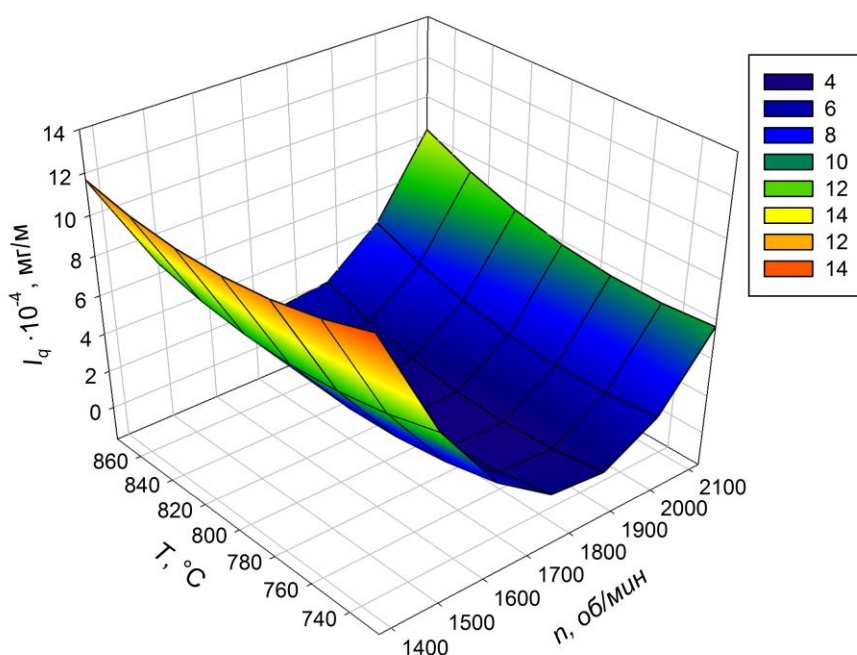


Рисунок 1. Зависимость интенсивности изнашивания  $I_q$  от частоты вращения детали  $n$  и температуры нагрева детали  $T$  ( $t = 8$  мин)



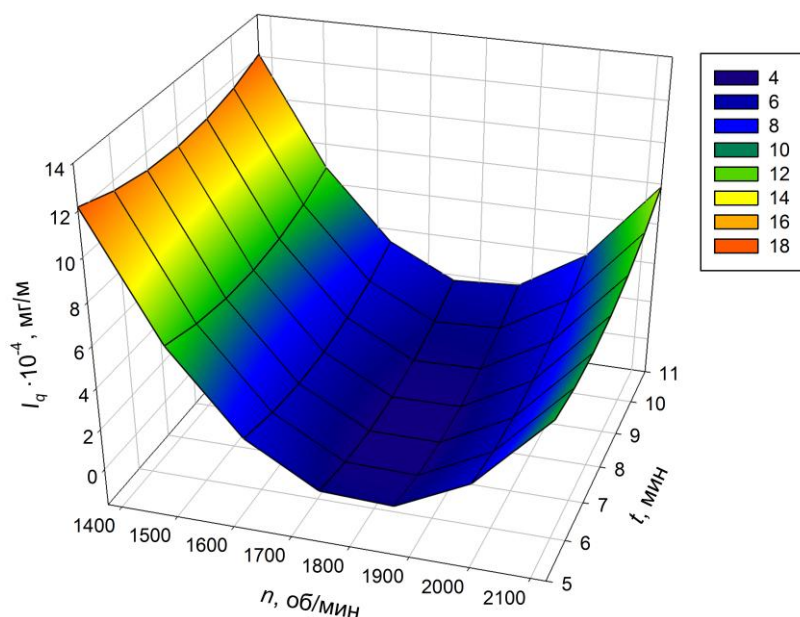


Рисунок 2. Зависимость интенсивности изнашивания  $I_q$  от частоты вращения детали  $n$  и времени изотермической выдержки  $t$  ( $T = 800$  °C)

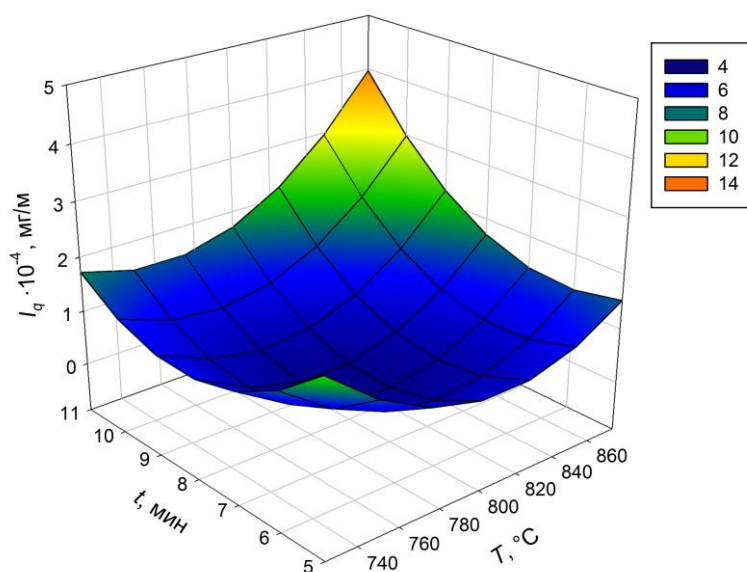


Рисунок 3. Зависимость интенсивности изнашивания  $I_q$  от температуры нагрева детали  $T$  и времени изотермической выдержки  $t$  ( $n = 1750$  об/мин)

Как видно из рисунков 1–3, изменение частоты вращения детали  $n$  влечет за собой изменения интенсивности изнашивания в большей степени, чем температура нагрева детали  $T$  или изотермическая выдержка  $t$ . Из рисунка 3 видно, что при частоте вращения детали  $n = 1750$  об/мин, минимальная интенсивность изнашивания  $I_q = 0,13–0,18 \cdot 10^{-4}$  мг/м обеспечивается при температуре нагрева детали  $T = 775–800$  °C и времени изотермической выдержки  $t = 7–8$  мин и дальнейшее увеличение этих параметров технически и экономически не рационально.

#### 4. Выводы

В результате проведенных исследований и с использованием методов математического планирования эксперимента была выполнена оптимизация процесса многослойной центробежной индукционной наплавки антифрикционных покрытий на основе алюминиевых сплавов, что позволило разработать математическую модель и определить оптимальную область значений технологических режимов наплавки. На основании результатов расчетно-экспериментального моделирования показано, что для получения оптимальной интенсивности изнашивания материала покрытия на основе алюминиевого сплава, параметры процесса центробежной индукционной наплавки должны быть следующие: частота вращения детали  $n = 1750\text{--}1875$  об/мин, температура нагрева детали  $T = 775\text{--}800$  °С, время изотермической выдержки  $t = 7\text{--}8$  мин.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П.А. Витязь [и др.]. – Минск: Беларус. думка, 1998. – 583 с.
2. Теория и практика электроимпульсного спекания пористых порошковых материалов / К.Е. Белявин [и др.]. – Минск: Ремико, 1997. – 180 с.
3. Центробежное припекание порошковых покрытий при переменных силовых воздействиях / Н.Н. Дорожкин [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1993. – 159 с.
4. Белявин, К.Е. Инженерные методы расчета температурно-временных параметров в процессах центробежной индукционной наплавки покрытий / К.Е. Белявин, И.А. Сосновский, А.А. Курилёнок // Перспективные материалы и технологии: монография: в 2 т.; под ред. чл.-корр. В.В. Рубаника. – Витебск: УО «ВГТУ», 2019. – Т. 2. – С. 5–18.
5. Сосновский, И.А. Термические параметры центробежного индукционного нанесения порошковых покрытий / И.А. Сосновский, Ю.Н. Гафо // Инженерно-физический журнал. – 2011. – Т. 84. - № 6. – С. 1135–1141.
6. Моделирование процессов индукционной наплавки порошковых покрытий, содержащих наноразмерные модификаторы / М.А. Белоцерковский [и др.] // Вестн. ПГУ, Серия В. – 2016. – № 3. – С. 66–74.
7. Induction centrifugal surfacing of the charge based on tin bronze powders with the addition of finely dispersed boehmite / I.A. Sosnovskiy [et al.] // Welding International. – 2016. – № 30(9). – Pp. 736–739. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1143590>.
8. Влияние олова в материале подслоя на структуру Al-Si сплава, наплавляемого центробежно индукционным методом / А.И. Комаров [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2019. – № 3(48). – С. 77–84.
9. Технологические особенности получения биметаллических втулок с антифрикционным покрытием из сплава АК12 / М.А. Белоцерковский [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. – 2019. – Вып. 8. – С. 320–324.
10. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

Поступила в редколлегию 05.01.2022г.